

引用格式:宋辰颖,刘梦茹,陈力,等.质子交换膜燃料电池用碳纸中基体碳含量和结构对碳纸性能的影响[J].材料工程,2025,53(11):197-203.

SONG Chenying, LIU Mengru, CHEN Li, et al. Effects of matrix carbon content and structure on performance of carbon paper for proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(11): 197-203.

# 质子交换膜燃料电池用碳纸中基体碳含量和结构对碳纸性能的影响

Effects of matrix carbon content and structure on performance of carbon paper for proton exchange membrane fuel cells

宋辰颖<sup>1</sup>,刘梦茹<sup>1</sup>,陈力<sup>1</sup>,蒙玲<sup>2,3</sup>,赵双双<sup>1</sup>,  
李海龙<sup>1\*</sup>,胡健<sup>1</sup>

(1 华南理工大学轻工科学与工程学院,广州 510640;

2 广州大学化学与化工学院,广州 510006;

3 黄埔氢能研究中心,广州 510006)

SONG Chenying<sup>1</sup>, LIU Mengru<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>, MENG Ling<sup>2,3</sup>,

ZHAO Shuangshuang<sup>1</sup>, LI Hailong<sup>1\*</sup>, HU Jian<sup>1</sup>

(1 School of Light Industry Science and Engineering, South China

University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2 School

of Chemistry and Chemical Engineering, Guangzhou University

Guangzhou 510006, China; 3 Huangpu Hydrogen

Innovation Center, Guangzhou 510006, China)

**摘要:**以用酚醛树脂作为基体碳制备碳纸,使用不同的热处理温度(1400~2700 °C)制备了不同结构的基体碳,并研究了基体碳含量和结构对质子交换膜燃料电池用碳纸的影响。结果表明:碳纸中的基体碳相较于碳纤维更容易发生石墨化转变;随着基体碳含量的增加,碳纸 $d_{002}$ 衍射峰更尖锐,热处理温度从2100 °C增加至2400 °C时,碳纸的石墨化度增加了45.2%,增幅最大。不同基体碳含量的碳纸随着热处理温度的升高其性能的变化并不完全相同。当基体碳含量为60% (质量分数,下同)和120%时,碳纸的厚度随着石墨化温度的升高逐渐下降,碳纸拉伸强度变化较小;当基体碳含量为200%和350%时,碳纸的厚度随石墨化温度的升高先略微降低然后升高,碳纸的拉伸强度随热处理温度的升高下降较快。碳纸面电阻率随着热处理温度的升高呈下降趋势,其变化趋势与厚度变化趋势基本一致。因此,在制备不同性能的碳纸时,需要考虑基体碳含量和结构的协同作用。

**关键词:**燃料电池;气体扩散层;碳纸;基体碳

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000557 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2023.000557

**中图分类号:** TS761; TM911.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)11-0197-07

**Abstract:** The preparation of carbon paper used phenolic resin as matrix carbon, and different heat treatment temperatures (1400-2700 °C) are used to obtain matrix carbon with different structures. At the same time, the effect of matrix carbon content and structure on carbon paper for proton exchange membrane fuel cell is studied. The results show that the matrix carbon in carbon paper is more prone to graphitization transformation than carbon fiber. As the content of the matrix carbon increases, the  $d_{002}$  diffraction peak of the carbon paper becomes sharper. When the heat treatment temperature increases from 2100 °C to 2400 °C, the graphitization of the carbon paper increases by 45.2%, which is the largest increase. With the increase of heat treatment temperature, the carbon papers, with different matrix carbon ratios, show differences in performance trends. When the carbon content of the matrix is 60% (mass fraction, the same below) and 120%, the thickness of the carbon paper gradually decreases with the

increase of the graphitization temperature, and the tensile strength of the carbon paper has a slight change; when the carbon content of the matrix is 200% and 350%, with the increase of graphitization temperature, the thickness of carbon paper decreases slightly and then increases, and the tensile strength of carbon paper decreases rapidly. The surface resistivity of carbon paper shows a downward trend with the increase of heat treatment temperature, and its change trend is basically consistent with the change trend of thickness. Therefore, when preparing carbon papers with different properties, it is necessary to consider the synergistic effect of matrix carbon content and structure.

**Key words:** fuel cell; gas diffusion layer; carbon paper; matrix carbon

由于人们日益增长的能源需求,全球气候问题、环境问题和能源困境对人类产生了重大影响,开发绿色能源已迫在眉睫。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cells, PEMFC)由于具备高能量密度、高效率、绿色、低温快速启动等优势,在各国能源战略中发挥着重要作用<sup>[1-4]</sup>。气体扩散层(gas diffuse layer, GDL)是PEMFC中关键零部件之一,需要具备排水、透气、导电、导热和支撑膜电极的能力<sup>[5-7]</sup>。

GDL由微孔层和基底层组成,碳纸由于其多孔性、低成本、尺寸稳定性好、低厚度成为商业上使用最广泛的基底层<sup>[8-9]</sup>。由于碳纤维之间缺乏结合力,通常使用树脂作为碳纸的基体碳,提供碳纤维之间的黏结力,从而使碳纸具有一定的力学强度<sup>[10-12]</sup>。但是树脂的加入会导致碳纸孔隙率降低、孔径减小和透气度减小等问题<sup>[13-15]</sup>。酚醛树脂由于成本低、碳收率高成为目前市场上最常用的树脂,为了探究酚醛树脂对碳纸性能的影响,研究人员做了许多努力。金谷音等<sup>[16]</sup>研究了酚醛树脂炭含量对碳纸组织结构和性能的影响,结果表明,树脂炭含量可以提高碳纸的体积密度和拉伸强度,但导致透气度性能的下降。Ko等<sup>[17]</sup>研究了酚醛树脂含量分别对碳纸、碳布性能的影响,结果表明,碳纸最佳的酚醛树脂浓度要高于碳布。Waseem等<sup>[18]</sup>确认了纤维/基体的比例对碳纸性能的重要性,在优化纤维/基体碳比例的同时,确保碳纸具有优异的孔隙率、力学性能和导电性。Zhang等<sup>[19]</sup>研究了热处理温度对碳纸性能的影响,研究显示随着热处理温度的升高,碳纸的电阻率和力学强度都随之下降,微晶尺寸都有所增长。

由以上的研究可以看出,研究人员更倾向于研究温度、树脂含量等单一因素对基体碳/碳纤维复合材料的影响。但是,含不同的基体碳含量的碳/碳纤维复合材料在不同的热处理温度下性能变化并不是一致的,同时考虑基体碳含量和结构的变化对碳纸性能的影响是十分必要的。因此,本工作优化基体碳的含量和结构,同时优化碳纸的性能,提高燃料电池功率密度和极限电流密度,为制备高性能的PEMFC提供理论基础。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 原纸的制备

将碳纤维(东丽株式会社),长丝短切为6 mm,然后与PVA纤维(可乐丽株式会社)以质量比9:1的比例混合进行疏解,疏解后的混合纤维放入成型器中过滤得到湿纸页,最后使用平板干燥器干燥得到碳纸原纸。

### 1.2 碳纸的制备

配制不同浓度的酚醛树脂(日本住友株式会社)-乙醇溶液,并将制备的原纸放入其中,充分浸渍1 min后取出,常温干燥后得到含不同酚醛树脂含量(60%、120%、200%和350%,质量分数,下同)浸胶纸。将浸胶纸放入烘箱中在80、100、120 °C下分别预固化30 min,预固化的样品放入平板热压机中,在140 MPa的压力下热压30 min取出,得到热压纸。最后,将热压纸放入箱式炉中,在N<sub>2</sub>气氛下以10 °C/min的升温速率分别加热到1400、1800、2100、2400、2700 °C,保温60 min,待冷却后取出即可得到碳纸。

### 1.3 表征

使用厚度仪(L&W250, Lorenzen Wettre)测试碳纸的厚度,测试时压力为50 Pa。使用透气度仪(FX 3300-IV)测试碳纸的透气度,测试压力差为200 Pa,测试面积为20 cm<sup>3</sup>。使用四探针仪(RTS-90)测试碳纸的面电阻率,测试探针之间的距离为1.59 mm。采用阿基米德原理,使用煤油浸渍碳纸<sup>[20]</sup>,并根据以下公式计算碳纸的孔隙率:孔隙率=(1-B<sub>a</sub>/K<sub>d</sub>)×100%, B<sub>a</sub>为碳纸在空气中的密度, K<sub>d</sub>为碳纸在煤油中的密度。采用标准GB/T 20042. 7—2014测试碳纸的拉伸强度,拉伸速度为10 mm/min。样品的拉曼光谱使用激光共聚焦微拉曼光谱仪(HJY LabRAM Aramis)测试。测试设备分辨率为1 μm,测试范围为100~4000 cm<sup>-1</sup>。测试所得到的G峰和D峰的信息采用高斯方程拟合计算得到。

使用多位自动进样X射线衍射仪(X'pert Powder)测试碳纸的层间距、石墨化度。测试使用单晶硅作为内标,将硅和碳纸一起研磨后放在样品仓中进行测

试,波长为 0.154 nm,  $0.02^\circ$  的步长从  $5^\circ$  到  $60^\circ$  的  $2\theta$  进行扫描,扫描速度为  $12^\circ/\text{min}$ 。采用峰分离法处理非对称峰,峰值由最大值确定。根据以下方程可以得到石墨的层间距( $d_{002}$ )和石墨化度( $G$ )<sup>[21]</sup>:

$$d_{002} = n\lambda / (2 \sin \theta) \quad (1)$$

$$G = (0.344 - d_{002}) / (0.344 - 0.3354) \quad (2)$$

式中: $d_{002}$  为石墨层间距; $n$  为反射级数; $\lambda$  为波长; $\theta$  为入射线、反射线与反射晶面之间的夹角。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微晶结构

碳材料的拉曼光谱中,结晶石墨的一阶拉曼光谱一般在  $1580 \text{ cm}^{-1}$  (G 峰) 处产生,由碳网六角平面内  $\text{sp}^2$  杂化的碳键振动所形成的。结晶石墨在  $2710 \text{ cm}^{-1}$  处也会产生强的特征峰,一般称之为结晶石墨的二阶拉曼光谱。非结晶碳缺乏晶体有序性,晶体中存在缺陷,在拉曼光谱中表现为在  $1350 \text{ cm}^{-1}$  (D 峰) 处产生一个特征峰。 $I_D/I_G$  是 D 峰强度和 G 峰强度的比值,用来

表示样品石墨架构的完整程度<sup>[22-23]</sup>。

图 1 为含不同基体碳含量和结构的碳纸中基体碳和碳纤维的 Raman 光谱图。在测试中,将激光束分别打在碳纤维和基体碳上,可以分别得到基体碳和碳纤维的谱图,图 1(a-1)~(d-1) 分别为基体碳含量为 60%、120%、200%、350% 碳纸中基体碳的 Raman 光谱图,图 1(a-2)~(d-2) 分别为基体碳含量为 60%、120%、200%、350% 碳纸中碳纤维的 Raman 光谱图。从图中可以看出,对于不同基体碳含量和结构的碳纸,基体碳的 D 峰强度都略低于碳纤维的 D 峰强度,基体碳的  $I_D/I_G$  的比值在不同温度下都比碳纤维小。随着热处理温度的升高,基体碳和碳纤维的谱图普遍表现为 G 峰半高宽变窄、强度增加, D 峰半高宽变窄、强度减弱,  $I_D/I_G$  的比值逐渐减小。这表明随着温度的升高基体碳和碳纤维中的二维乱层结构逐渐向三维有序结构转变,晶体结构的缺陷减少。但是有部分样品的  $I_D/I_G$  比值随着温度的升高有微弱的上升趋势,这是因为热处理温度较高时  $I_D$  的峰值太小,在 D 峰扫描和拟合时可能会产生微弱的误差。

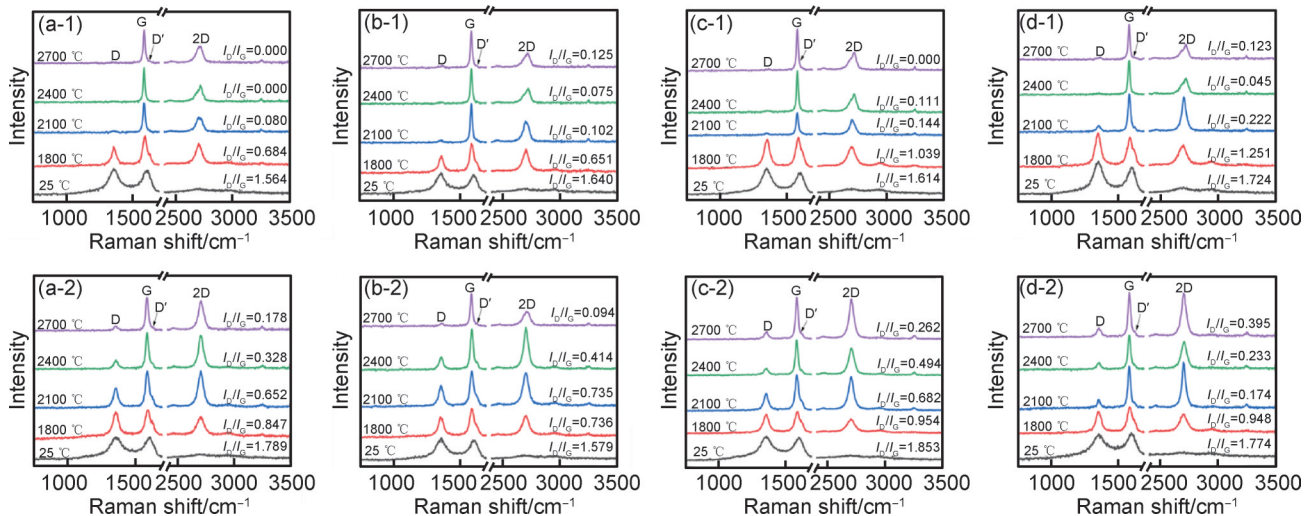


图 1 不同基体碳含量和结构的碳纸中基体碳(1)和碳纤维(2)的 Raman 光谱图

(a) 基体碳含量 60%; (b) 基体碳含量 120%; (c) 基体碳含量 200%; (d) 基体碳含量 350%

Fig. 1 Raman spectra of matrix carbon (1) and carbon fibers (2) in carbon papers with different matrix carbon contents and structures  
(a) matrix carbon content of 60%; (b) matrix carbon content of 120%; (c) matrix carbon content of 200%; (d) matrix carbon content of 350%

图 2(a)~(d) 分别是基体碳含量为 60%、120%、200%、350% 的碳纸在不同热处理温度的 XRD 谱图。由图可见,热处理温度达到  $1800^\circ\text{C}$ , 不同基体碳含量的碳纸  $d_{002}$  峰的峰强度都较小, 热处理温度从  $1800^\circ\text{C}$  上升至  $2100^\circ\text{C}$  时,  $d_{002}$  峰的峰强度略微增大, 但是热处理温度从  $2100^\circ\text{C}$  上升至  $2400^\circ\text{C}$  时,  $d_{002}$  峰的峰强度有非常明显的增强, 峰变得更尖锐。这说明含不同基体碳含量的碳纸整体的石墨化度在  $2100^\circ\text{C}$  和  $2400^\circ\text{C}$  发

生了明显的增强。图 2(e) 是热处理温度为  $2700^\circ\text{C}$  时碳纸的 XRD 谱图, 由图可知, 随着碳纸中基体碳含量的升高, 碳纸  $d_{002}$  峰半高宽略微变窄, 峰强度变大。这可能是因为, 基体碳含量越高测试的结晶总体区域更大, 结晶结构的增大会导致 X 射线衍射增强, 从而增强了衍射峰的强度。

衍射图中  $d_{002}$  峰的位置和强度可用于计算石墨晶体结构的石墨化度和晶面间距<sup>[24]</sup>。对 XRD 的结果进

行计算,可以得到碳纸微晶结构的部分数据。基体碳含量和结构对碳纸石墨化度和层间距 $d_{002}$ 的影响如图2(f)所示。由图可知,随着热处理温度的升高,碳纸的石墨化度逐渐增加, $d_{002}$ 层间距逐渐减小,这说明碳纸中无序的二维乱层结构向三维有序结晶结构逐渐

转变。对于基体碳含量为60%的碳纸,分别在1800、2100、2400℃和2700℃下进行热处理,其石墨化度分别为22.7%、38.7%、83.9%和90.5%。热处理温度由2100℃上升到2400℃,碳纸的石墨化度增加了45.2%,增幅最大,这与 $d_{002}$ 衍射峰强的变化趋势一致。

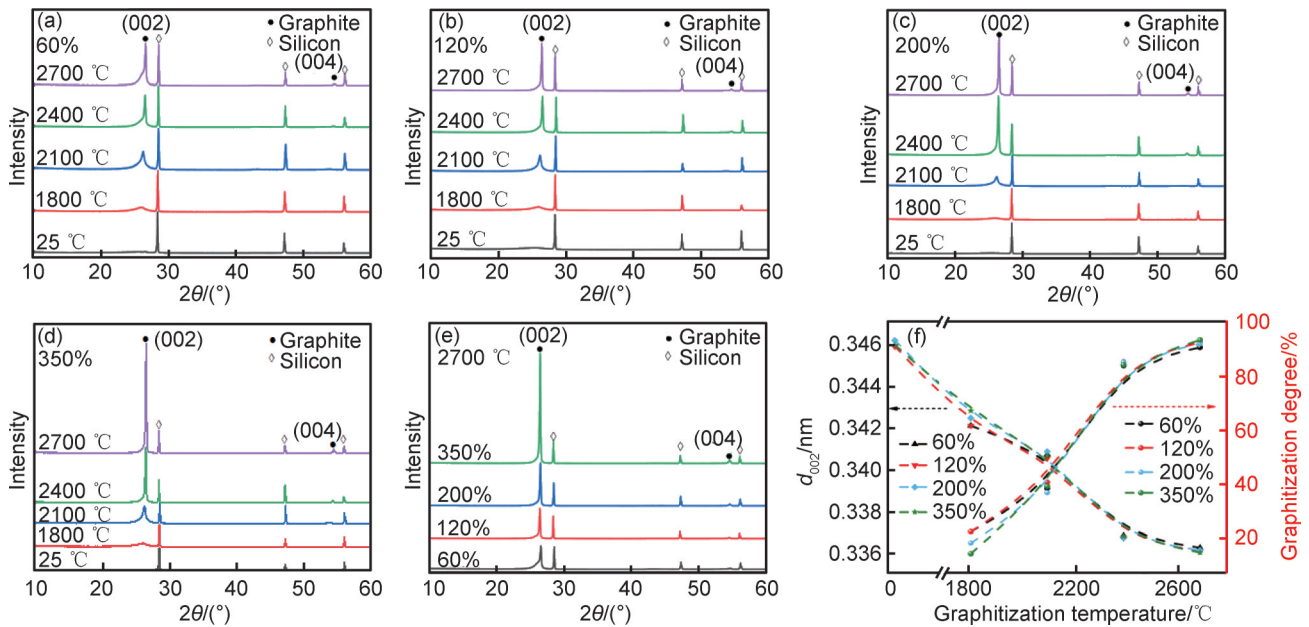


图2 不同热处理温度下基体碳含量为60%、120%、200%、350%碳纸的XRD图(a)~(d),热处理温度为2700℃碳纸的XRD谱图(e),碳纸中基体碳含量和结构对碳纸石墨化度和层间距 $d_{002}$ 的影响(f)

Fig.2 XRD patterns of carbon paper with matrix carbon content of 60%, 120%, 200%, 350% at different heat treatment temperatures(a)-(d), XRD patterns of heat treatment temperature of 2700 °C(e), and influence of matrix carbon content and structure on carbon paper graphitization degree and interlayer spacing  $d_{002}$ (f)

图3为基体碳含量60%和350%碳纸的SEM图。从图中可以得知,随着温度的升高,基体碳表面越来越粗糙,碳纤维表面的沟壑也会随之变深。碳纸中基体碳含量为60%时,热处理温度到2700℃碳纤维表面的沟壑有明显的形貌变化;但是基体碳含量为350%时,热处理温度到2100℃碳纤维表面形貌就出现了明

显的变化。热处理温度相同时,基体碳含量为350%的碳纸中的基体碳表面形貌比基体碳含量为60%碳纸的表面形貌明显粗糙。

## 2.2 碳纸的物性

碳纸的厚度是燃料电池产物水的重要因素,酚醛树脂作为碳纸中的基体碳,其含量和结构与碳纸的厚

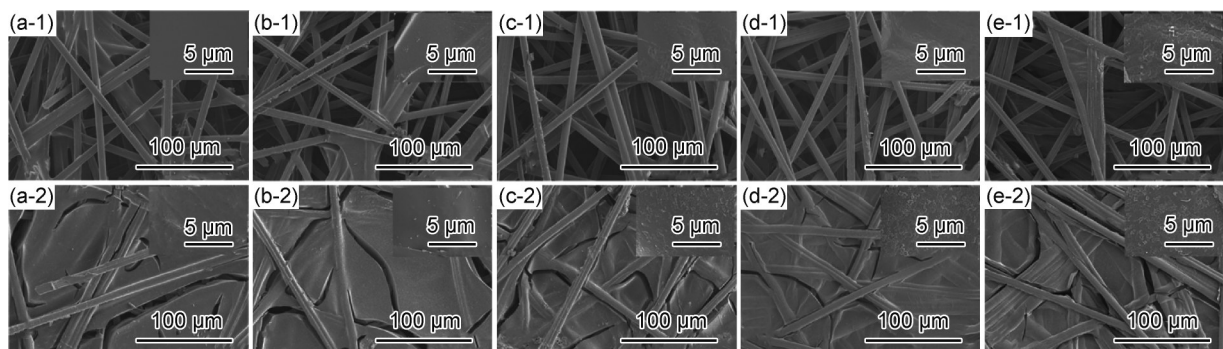


图3 不同温度下基体碳含量为60%(1)及350%(2)的碳纸SEM图

(a)1400 °C;(b)1800 °C;(c)2100 °C;(d)2400 °C;(e)2700 °C

Fig.3 SEM images of carbon paper with 60%(1)and 350%(2)matrix carbon content at different temperatures

(a)1400 °C;(b)1800 °C;(c)2100 °C;(d)2400 °C;(e)2700 °C

度密切相关。图 4 显示了含不同基体碳含量的碳纸在不同石墨化温度下处理后的厚度变化趋势图。可以看出,随着基体碳含量的升高,碳纸的厚度随之下降。这是因为基体碳作为碳纤维之间的黏结剂,基体碳含量越高,碳纤维之间的黏结越紧密,导致碳纸的厚度下降。随着温度的变化,不同基体碳含量的碳纸变化趋势略有不同。当基体碳含量为 60% 和 120% 时,碳纸的厚度随着石墨化温度的升高逐渐下降;当基体碳含量为 200% 和 350% 时,碳纸的厚度随石墨化温度的升高先略微减低然后升高。这可能是由于在碳化石墨化过程中非碳元素逸出,基体碳在收缩的同时产生的气体会增加碳纸的厚度。基体碳含量较高,热处理温度超过 2400 °C 时,碳纸厚度的变化由逸出的气体所主导,因此碳纸的厚度增加。

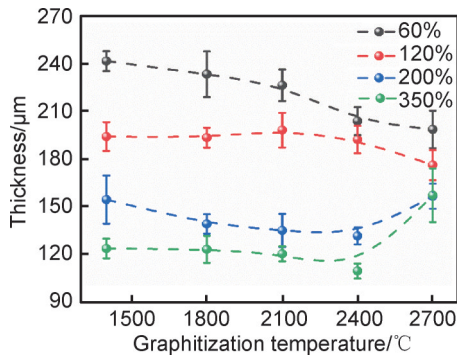


图 4 碳纸中基体碳含量和结构对碳纸厚度的影响  
Fig.4 Effect of matrix carbon content and structure on the thickness of carbon paper

碳纸的透气度影响着燃料电池反应气体的传输,对燃料电池的极限电流密度有较大影响。图 5 为碳纸的透气度与基体碳含量和结构的关系图。从图中可以看出,基体碳含量的增加会导致碳纸透气度的下降,这是由于基体碳存在于碳纤维之间,填充了碳纤

维之间的空隙,导致碳纸的透气度下降。热处理温度的变化对碳纸透气度的影响较小,这可能是因为碳纸透气度的变化主要由两方面引起:一方面非碳元素的逸出增加了碳纸的孔隙率,导致碳纸的透气度增加;另一方面树脂的收缩减小了碳纸的孔径,导致碳纸的透气度下降。两种变化因素的共同作用导致随着热处理温度的变化,碳纸透气度的变化并不明显。

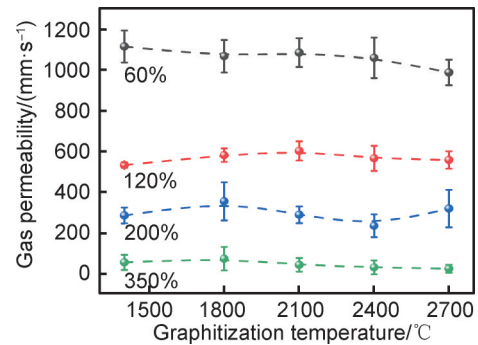


图 5 碳纸中基体碳含量和结构对碳纸透气度的影响  
Fig.5 Effect of matrix carbon content and structure on the gas permeability of carbon paper

碳纸的电阻率影响着燃料电池的欧姆阻抗,从而影响了燃料电池的电流密度和功率密度。图 6 为碳纸中基体碳含量和结构对碳纸面电阻率的影响趋势图。由图 6(a)可以看出,随着基体碳含量的增加,碳纸的面电阻率逐渐降低。在 1400 °C 时,基体碳含量为 60%、120%、200% 和 350% 的碳纸面电阻率分别为 27.97、18.82、12.14 mΩ·cm 和 7.67 mΩ·cm,基体碳含量为 350% 碳纸的面电阻率相较于基体碳含量为 60% 碳纸的面电阻率下降了 72.6%。这是因为基体碳填充在碳纸的孔隙内,增强碳纸的三维导电网络,更有利于电子的传输,从而减小碳纸的面电阻率。

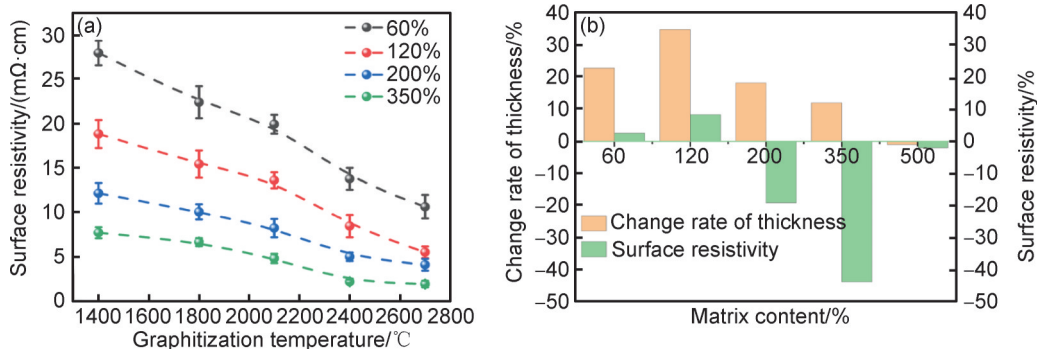


图 6 碳纸中基体碳含量和结构对碳纸面电阻率的影响(a)及热处理温度由 2400 °C 上升到 2700 °C 碳纸厚度和面电阻率的变化率(b)

Fig.6 Trend chart of the influence of matrix carbon content and structure on the surface resistivity of carbon paper (a) and the change rate of carbon paper thickness and surface resistivity when the heat treatment temperature increases from 2400 °C to 2700 °C (b)

从图6(a)中还可以看出,随着温度的升高,碳纸的面电阻率呈下降趋势。但是含不同含量基体碳的碳纸,面电阻率的下降幅度略有不同。图6(b)为热处理变化由2400℃上升到2700℃时,碳纸的厚度和面电阻率的变化图。碳纸厚度变化分别为22.9%、35.1%、18.3%、12.1%时,碳纸面电阻率的变化分别为2.6%、8.4%、-19.1%、-43.8%。由此可见,碳纸厚度变化对面电阻率有十分重要的影响。碳纸的面电阻率主要由两个因素影响:碳纸三维导电网络和碳纸中材料的导电性。随着热处理温度的升高,基体碳和碳纤维中的非碳元素逸出,晶体结构逐渐从二维乱层结构向三维有序结构转变,增加了基体碳和碳纤维自身的导电性,从而增加了碳纸的电导率。碳纸厚度的变化会改变碳纸的三维导电网络结构,厚度的增加会使碳纸中三维导电网络结构更加紧密,因此,厚度降低的碳纸在热处理温度下其面电阻率降低程度相较于厚度增加的碳纸更加显著。

基体碳作为碳纤维之间的黏结剂,是影响碳纸力学强度最重要的因素。图7为碳纸中基体碳含量和结构对碳纸拉伸强度的影响趋势图。从图中可以看出,基体碳含量为200%和350%碳纸的力学性能,误差棒明显要高于基体碳含量为60%和120%的碳纸,这是由于基体碳含量的升高会导致基体碳分散的均匀性。随着热处理温度的升高,碳纸的力学性能普遍呈下降趋势。但是,不同基体碳含量的碳纸下降幅度并不一致,基体碳含量为200%和350%碳纸的力学性能随着热处理温度的升高下降较快,基体碳含量为60%和120%的碳纸,随着热处理温度的变化,碳纸强度的整体变化趋势不大。这可能是因为基体碳含量较高的碳纸在热处理后冷却的过程中碳纤维/基体碳之间产生了较大的拉伸应力,这可能导致基体碳中产生较多的裂纹,施加拉伸载荷时基体更容易开裂,降低了碳纸的力学强度。基体碳含量较低的碳纸,碳纤

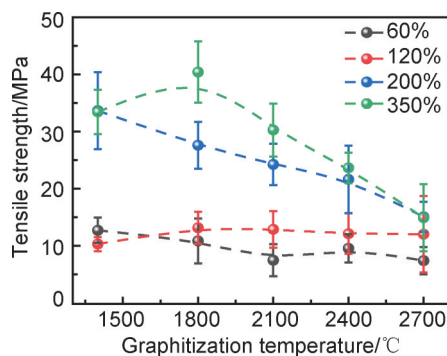


图7 碳纸中基体碳含量和结构对碳纸拉伸强度的影响  
Fig.7 Effect of matrix carbon content and structure on the tensile strength of carbon paper

维和基体碳的结合力相对较弱,在施加拉伸载荷时,应力可以在基体/碳纤维界面处进行偏转,获得一定的韧性和强度,从而提升碳纸的力学性能<sup>[25]</sup>。

### 3 结论

(1) 对于不同基体碳含量和结构的碳纸,基体碳的D峰强度都略低于碳纤维的D峰强度,基体碳的 $I_D/I_G$ 的比值在不同温度下都比碳纤维小。XRD的测试结果和Raman的测试结构互相验证,碳纸中的基体碳相较于碳纤维更容易发生石墨化转变;随着基体碳含量的增加,碳纸 $d_{002}$ 衍射峰更尖锐。不同基体碳含量的碳纸随着热处理温度的升高其性能的变化并不完全相同。当基体碳含量为60%和120%时,碳纸的厚度随着石墨化温度的升高逐渐下降,碳纸拉伸强度变化较小;当基体碳含量为200%和350%时,碳纸的厚度随石墨化温度的升高先略微降低然后升高,碳纸的拉伸强度随热处理温度的升高下降较快。碳纸面电阻率随着热处理温度的升高呈下降趋势,其变化趋势与厚度变化趋势基本一致。

(2) 当温度不变时,随着基体碳含量的升高,碳纸的厚度、透气度和面电阻率都逐渐减小,拉伸强度逐渐增大。基体碳作为碳纤维之间的黏结剂,填充在碳纤维之间的空隙中,基体碳含量越高,碳纤维之间的黏结越紧密,填充在空隙中的基体碳越多,降低了碳纸的厚度和透气度,增强了碳纸的三维导电网络结构。根据以上研究可以发现,当碳纸中基体碳含量不同时,碳纸的性能随温度的升高会呈现不同的变化。

(3) 根据燃料电池的种类,可以选择不同基体碳含量的碳纸。例如,应用于水电解的燃料电池可以选用基体碳含量高、碳化温度高的碳纸,因为此类碳纸具有较高的电导率和耐腐蚀性。应用于高电流密度的燃料电池,可以选用基体碳含量较少的碳纸,因为此类碳纸较高的透气度。

### 参考文献

- [1] LIU H, ZHAO J, LI X. Controlled synthesis of carbon-supported Pt-based electrocatalysts for proton exchange membrane fuel cells [J]. *Electrochemical Energy Reviews*, 2022, 5(4): 13.
- [2] JIAO K, LI X. Water transport in polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, 37(3): 221-291.
- [3] JIAO K, XUAN J, DU Q, et al. Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells [J]. *Nature*, 2021, 595(7867): 361-369.
- [4] WANG Y, WANG X, WANG X, et al. Droplet dynamic characteristics on PEM fuel cell cathode gas diffusion layer with gra-

- dient pore size distribution[J]. *Renewable Energy*, 2021, 178: 864-874.
- [5] LEE F C, ISMAIL M S, INGHAM D B, et al. Alternative architectures and materials for PEMFC gas diffusion layers: a review and outlook [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 166: 112640.
- [6] OKONKWO P C, OTOR C. A review of gas diffusion layer properties and water management in proton exchange membrane fuel cell system[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45 (3): 3780-3800.
- [7] MORGAN J M, DATTA R. Understanding the gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells. I. how its structural characteristics affect diffusion and performance [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 251: 269-278.
- [8] ZHANG W, WANG Y. Modification and durability of carbon paper gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cell[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(6): 9371-9381.
- [9] FU X, WEI J, NING F, et al. Highly flat and highly homogeneous carbon paper with ultra-thin thickness for high-performance proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) [J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 520: 230832.
- [10] PARK S, LEE J W, POPOV B N. A review of gas diffusion layer in PEM fuel cells: materials and designs[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(7): 5850-5865.
- [11] OZDEN A, SHAHGALDI S, LI X, et al. A review of gas diffusion layers for proton exchange membrane fuel cells: with a focus on characteristics, characterization techniques, materials and designs [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 74: 50-102.
- [12] HAN M, XU J H, CHAN S H, et al. Characterization of gas diffusion layers for PEMFC [J]. *Electrochimica Acta*, 2008, 53 (16): 5361-5367.
- [13] SANG M, MENG Y, WANG S, et al. Graphene/cardanol modified phenolic resin for the development of carbon fiber paper-based composites[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(43): 24464-24469.
- [14] TAHERIAN R, GHORBANI M M, NASR M, et al. Fabrication and investigation of polymer-based carbon composite as gas diffusion layer of proton exchange membrane of fuel cells[J]. *Materials Science: Advanced Composite Materials*, 2018, 2 (1): 1-12.
- [15] KIM H, LEE Y J, PARK G G, et al. Fabrication of carbon paper containing PEDOT: PSS for use as a gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells [J]. *Carbon*, 2015, 85: 422-428.
- [16] 金谷音, 谢志勇, 黄启忠. 酚醛树脂炭含量对炭纸组织结构和性能的影响[J]. *炭素技术*, 2011, 30(1): 19-23.
- JIN G Y, XIE Z Y, HUANG Q Z. Effects of PF resin char content on structure and properties of carbon paper[J]. *Carbon Techniques*, 2011, 30(1): 19-23.
- [17] KO T H, LIAO Y K, LIU C H. Effects of fabricated gas diffusion layers with different reinforce materials in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) [J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22 (6): 4092-4097.
- [18] WASEEM S, MAHESHWARI P H, ABINAYA S, et al. Effect of matrix content on the performance of carbon paper as an electrode for PEMFC [J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(7): 2897-2909.
- [19] ZHANG X, SHEN Z. Carbon fiber paper for fuel cell electrode [J]. *Fuel*, 2002, 81(17): 2199-2201.
- [20] MATHUR R B, MAHESHWARI P H, DHAMI T L, et al. Characteristics of the carbon paper heat-treated to different temperatures and its influence on the performance of PEM fuel cell [J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 52(14): 4809-4817.
- [21] ZOU L, HUANG B, HUANG Y, et al. An investigation of heterogeneity of the degree of graphitization in carbon-carbon composites [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, 82 (3): 654-662.
- [22] DENNISON J R, HOLTZ M, SWAIN G. Raman spectroscopy of carbon materials[J]. *Spectroscopy*, 1996, 11(8):38-45.
- [23] CUESTA A, DHAMELINCOURT P, LAUREYNS J, et al. Raman microprobe studies on carbon materials [J]. *Carbon*, 1994, 32(8): 1523-1532.
- [24] BARNAKOV C N, KHOKHLOVA G P, POPOVA A N, et al. XRD characterization of the structure of graphites and carbon materials obtained by the low-temperature graphitization of coal tar pitch [J]. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2015, 17(2): 87-93.
- [25] KOWBEL W, SHAN C H. The mechanism of fiber: matrix interactions in carbon: carbon composites[J]. *Carbon*, 1990, 28(2/3): 287-299.
- 基金项目:**广东省基础与应用基础研究基金项目(2019B151502043); 国家自然科学基金青年科学基金项目(22208069)
- 收稿日期:**2023-08-22; **录用日期:**2023-09-26
- 通讯作者:**李海龙(1989—),男,教授,博士,研究方向为特种浆制备及应用、新型防伪基材、新型碳纸基功能材料,联系地址:广东省广州市天河区五山路华南理工大学轻工科学工程学院(510640), E-mail: felhl@scut.edu.cn

(本文责编:张宝玲)